

Formação de microjatos e danos por cavitação em corpos de prova de alumínio

Micro-Jets formation and damages by cavitation on aluminum test specimens

Gil Bazanini^{*}; Ricardo Kirchhof Unfer[†]; Nicodemus da Costa Neto Lima[‡]

RESUMO

Nos estágios finais do colapso de cavidades, surgem ondas de choque e microjatos. O formato destes microjatos produzidos nos estágios finais do colapso das cavidades são estudados com o objetivo de explicá-los. Cálculos efetuados para a temperatura do conteúdo de cavidades (gás e vapor de água) determinaram valores em torno de 2.500 K, nos estágios finais do colapso. Marcas resultantes, ou pits devidas a cavitação nos corpos de prova em alumínio são obtidas experimentalmente com o dispositivo a disco rotativo contando com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura. Explicações são apresentadas baseadas na teoria do escoamento potencial, explicando os danos por cavitação observados.

PALAVRAS-CHAVE: cavitação; escoamento; potencial; danos.

ABSTRACT

In the final stages of the collapse of cavities, there are the formation of microjets as well as shock waves. The form of these micro-jets created in the final stages of the collapse are studied with the goal to explain the shape of the pits formed on the surface of the commercial aluminum specimens tested. In the past, calculation of the temperature of the cavity contents in its final stages of the collapse shows great values for the temperature (of about 2,500 K) for the vapor and gas trapped inside it. These resulting marks on the specimen surfaces are obtained experimentally by the use of the compact rotating disc device and a scanning electronic microscope, and some explanation is attempted, based on the theories of the potential flow and forms. Such explanations worked well to explain the cavitation pits observed.

KEYWORDS: cavitation; potential flow; damages.

1 INTRODUÇÃO

Quando as bolhas oriundas da cavitação sofrem colapso próximo a superfícies sólidas, podem ocorrer danos às mesmas. Dois são os mecanismos de danos: incidência de micro-jatos de líquidos e ondas de choque. Devido à complexidade do processo, tais fenômenos encontram-se ainda em estudo. O formato dos microjatos pode ser cônico ou hiperbólico (Bazanini; Unfer; Lima, 2020). Aqui será tratado o estudo dos microjatos hiperbólicos, visando uma melhor compreensão dos mesmos e, conseqüentemente, da cavitação como um todo, em especial dos pits de cavitação. O estudo das formas teve início na década de 1960 com o meteorologista Edward Lorentz (Riccieri, 1990 e Petiot, 2015), ao realizar simulações para prever as condições climáticas. A forma hiperbólica dos jatos de combustível em motores de combustão foi prevista teoricamente por Riccieri (1990) e numericamente por Nicoud (2015).

Nas imagens disponíveis na literatura (Brennen, 1995), não é possível distinguir a forma dos microjatos entre a cavidade e a superfície sólida. Portanto, uma análise teórica da forma é pretendida aqui, utilizando o escoamento potencial (uma vez que a viscosidade da água é relativamente baixa) para fins de comparação com os pits de cavitação observados experimentalmente neste trabalho. A velocidade desses microjatos é de cerca de 100 m/s (Frank; Michel, 2005).

*  Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, Santa Catarina, Brasil.

†  Universidade do Estado de Santa Catarina, São Bento do Sul, Santa Catarina, Brasil.

‡  Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, Santa Catarina, Brasil.

A visualização dos fluxos pode ser possível pelo uso da teoria do escoamento potencial, onde as funções corrente ψ representam o próprio escoamento.

Da teoria dos números complexos:

$$z = x + i y \quad (1)$$

O potencial complexo w é dado por Chorlton (2004):

$$w = \phi + i \psi \quad (2)$$

Onde ϕ é o potencial de velocidade.

Como a viscosidade da água é relativamente baixa, justifica-se o uso do escoamento potencial.

Para criar experimentalmente a erosão devido aos microjatos, foi utilizado o dispositivo de disco rotativo (Bazanini; Bressan, 2017), que pode ser visto na Figura 1, associado a observações com um microscópio eletrônico de varredura.

O equipamento de teste proposto por Bazanini e Bressan (2017) consiste em uma câmara de água dentro da qual um disco metálico está em rotação. Na superfície do disco, existem indutores de cavitação (furos passantes) próximos aos corpos de prova. O disco é fixado ao eixo rotativo e pode ser removido para fixar e retirar os corpos de prova. Uma tampa de vidro é montada na câmara para visualizar o fluxo e a formação de bolhas em seu interior.

O objetivo do equipamento é criar as bolhas de cavitação. Essas bolhas, ao colapsarem sobre a superfície dos corpos de prova, serão responsáveis pela erosão por cavitação da superfície dos corpos de prova fixados na superfície do disco.

Para controlar a vazão de água de resfriamento da câmara, são utilizadas válvulas de entrada e saída. A temperatura e a pressão são monitoradas por um termômetro e um manômetro de escalas 0-100 °C e 0-3 bar, respectivamente. A rotação do motor e o consumo de potência são registrados pelo inversor de frequência. O equipamento foi operado a pressão atmosférica, e a temperatura na câmara foi mantida a 37 °C.

Após 5 horas de operação em condições de cavitação, os corpos de prova são retirados, limpos por ultrassom, secados e pesados para se obter a perda de massa ocorrida no processo utilizando uma balança digital de resolução 0,1 mg. A precisão nas medidas é de +- 0,2 mg.

Os pits de erosão foram observados com auxílio de um microscópio eletrônico. Embora sejam esperados vários tamanhos de cavidades, um raio inicial médio razoável é de 1 mm, resultando em um diâmetro inicial de microjato de cerca de 0,1 mm (10% do raio inicial da cavidade), de acordo com Frank e Michel (2005); a temperatura calculada por Bazanini (2003) neste caso atingiu um valor máximo de cerca de 2.500 K, ou 2.227 °C.

Figura 1. Dispositivo a Disco Rotativo, Vista em Perspectiva e Frontal.



Fonte: Próprios autores.

2 MÉTODO

Nos estágios finais do colapso de uma cavidade próxima a uma parede sólida, a cavidade assume uma forma toroidal, de onde o microjato emerge em direção à parede (Bazanini; Barbosa; Lima, 2017), impactando sua superfície.

Uma analogia é feita entre o jato através da cavidade toroidal e o fluxo através de uma abertura. Neste caso, a função é (Chorlton, 2004):

$$z = c \cosh w \quad (3)$$

Onde c é uma constante real.

Substituindo as equações (1) e (2) na equação (3) e resolvendo para x e y :

$$x = c \cosh \phi \cos \psi \quad (4)$$

e

$$y = c \sinh \phi \sin \psi \quad (5)$$

Resolvendo as Equações (4) e (5) para funções corrente constantes ψ , resulta:

$$\frac{x^2}{c^2 \cos^2 \psi} - \frac{y^2}{c^2 \sin^2 \psi} = 1 \quad (6)$$

Como esta é a equação de uma cônica (uma hipérbole, na verdade), os jatos que passam pela cavidade toroidal devem ter uma forma hiperbólica, onde c são os focos da hipérbole (Venturi, 2003), que irão do centro à superfície interna da cavidade toroidal (Figura 2):

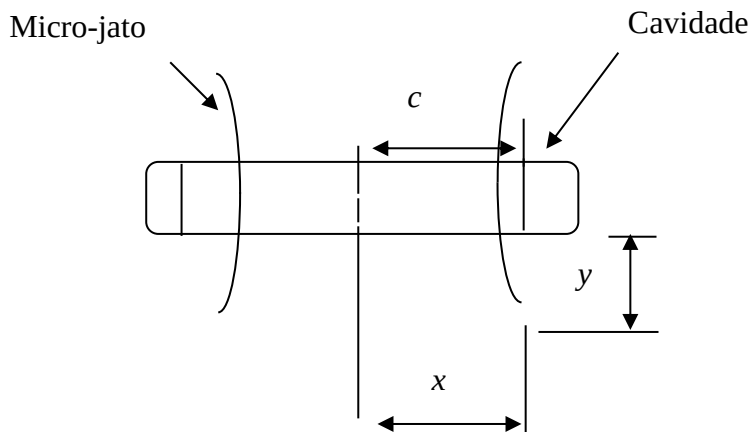
$$c^2 = a^2 + b^2 \quad (7)$$

E a excentricidade da hipérbole é definida como:

$$\varepsilon = \frac{c}{a} \quad (8)$$

Assim, a forma das funções corrente, bem como as dimensões utilizadas nos cálculos, podem ser vistas na Figura 2.

Figura 2. Cavidade Toroidal e Microjatos Hiperbólicos.



Fonte: Próprios autores.

x será o valor da metade do diâmetro do pitt da cavidade $\varnothing_{pitt}$ e y será a distância da cavidade à superfície da amostra.

Na parte experimental, os corpos de prova em alumínio comercial, de 25,4 milímetros de diâmetro, foram retirados após 5 horas de operação em condições de cavitação no equipamento, limpos por ultrassom, secos e imagens de sua superfície também foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura, MEV (Figura 3).

Antes dos experimentos, foi obtida a composição química (ver Tabela 1) dos corpos de prova, bem como sua microdureza Vickers.

Para a microdureza Vickers (HV300gf), obteve-se um valor de 99,70. Os experimentos foram realizados à pressão ambiente ao nível do mar e a temperatura medida foi de 37°C.

Figura 3. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).



Fonte: Próprios autores.

Tabela 1. Composição Química dos Corpos de Prova.

Elementos Químicos	Peso (%)
Pb	0.01
Zn	0.02
Al	98.24
Fe	0.22
Si	0.45
Cu	0.16
Mn	0.22
Mg	0.68

Fonte: Próprios autores.

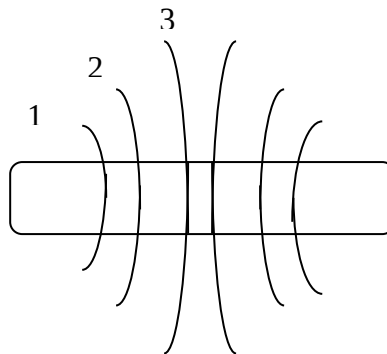
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Embora o escoamento potencial seja utilizado para escoamentos bidimensionais, a aplicação aqui é viável, pois o microjato pode ser considerado simétrico em cada direção.

Cada função corrente terá um valor diferente para ψ , correspondendo a uma hipérbole com sua própria excentricidade ϵ .

A forma das três linhas hiperbólicas selecionadas, utilizando o fluxo potencial através de uma abertura, aparece de forma qualitativa em Cole (1962). Aqui, foram calculadas as funções corrente ψ , bem como a excentricidade ϵ para algumas linhas, mostradas na Figura 4 e denominadas como 1, 2 e 3, respectivamente, para apresentá-las de forma quantitativa, portanto. Esses valores são apresentados na Tabela 2.

Figura 4. Linhas Seleccionadas para Cálculos da Função corrente e Excentricidade para os Microjatos Hiperbólicos.



Fonte: Próprios autores.

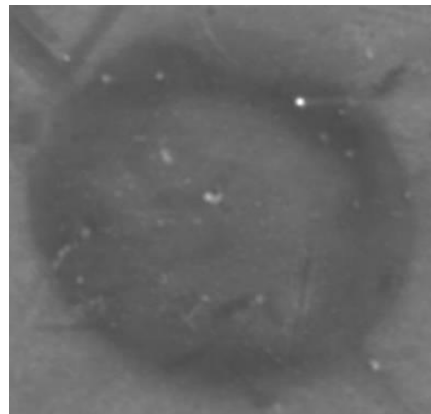
Tabela 2. Valores calculados da função corrente ψ e excentricidade ε para microjatos hiperbólicos.

Linha	Função corrente ψ	Excentricidade ε
1	0.45	1.1
2	1.05	2.0
3	1.47	10.0

Fonte: Próprios autores.

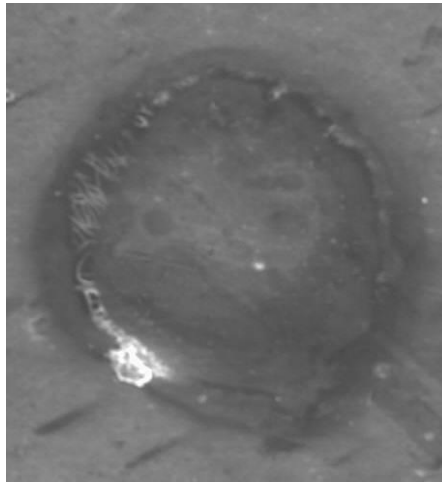
As imagens dos pits após os experimentos em condições de cavitação para os corpos de prova em alumínio comercial são mostradas nas Figuras 5 a 7. Elas foram utilizadas nas medições e cálculos dos respectivos pits.

Figura 5. Alumínio após 5 horas em Condições de Cavitação, 100x, Pitt 1.



Fonte: Próprios autores.

Figura 6. Alumínio após 5 horas em condições de cavitação, 100x, Pitt 2.



Fonte: Próprios autores.

É importante notar que praticamente nenhuma perda de massa significativa foi observada na amostra de alumínio, possivelmente devido ao enrijecimento térmico, uma vez que, com gradientes de temperatura suficientemente altos, surgem deformações plásticas locais, que podem levar ao endurecimento da superfície. Crateras circulares escurecidas também foram observadas, possivelmente porque a temperatura de flash foi atingida.

Em seu artigo mais recente, Kulmann et al. (2023), trabalhando com bolhas geradas a laser, também não observaram perdas de massa significativa na amostra de alumínio testada.

Figura 7. Alumínio após 5 horas em Condições de Cavitação, 100x, Pitt 3.



Fonte: Próprios autores.

Tal resistência a novas deformações após a deformação plástica é possivelmente devido ao endurecimento superficial (Almeida, 2024) associado a alta temperatura (enrijecimento térmico).

Tabela 3. Valores Medidos e Calculados para os Pits.

Pitt	1	2	3
$\varnothing_{pitt}$ (medido), μm	250	282	220
x (calculado), μm	125	141	110
y (calculado), μm	212	240	186
Δt (calculado), μs	2,12	2,40	1,86

Fonte: Próprios autores.

Os valores calculados e medidos para um valor médio para a função corrente juntamente com a excentricidade da hipérbole são mostrados na Tabela 2, onde Δt é o tempo necessário para o microjato atingir a superfície do sólido, neste caso, o corpo de prova, considerando uma velocidade do jato de 100 m/s.

Nas imagens de Brennen (2005), embora não seja possível identificar o formato do microjato, é possível observar uma distância y de cerca de 170 μm , para um período de tempo Δt de cerca de 2 a 4 μs .

Para uma velocidade do microjato de 100 m/s e densidade da água de 1000 kg/m³, a energia específica do microjato é de aproximadamente 10⁷ J/m³.

Considerando um tempo de aproximadamente 2 microsegundos para o jato atingir o corpo de prova, e 5 horas de operação do equipamento em condições cavitantes, teremos uma incidência de aproximadamente 10¹⁰ microjatos. Como o equipamento foi projetado para a formação das bolhas, ou cavidades, sobre os corpos de prova, estas se formam em nuvens.

Caso todos os microjatos jatos oriundos do colapso das bolhas incidam sobre um futuro pitt de cavitação, a superfície receberá uma energia específica total de 10¹⁷ J/m³, mais que suficiente para provocar deformação plástica no corpo de prova, tendo sido obtida uma profundidade media de aproximadamente 0,01 mm para os pits.

4 CONCLUSÕES

Em primeiro lugar, nenhuma perda de massa significativa foi observada durante o processo. Isso possivelmente ocorreu devido ao endurecimento superficial e térmico, que levou à deformação plástica em vez de perda de massa e aumentou a resistência do material a novas deformações, resultando em crateras circulares escurecidas.

De qualquer forma, foi possível visualizar os danos na superfície dos corpos de prova após 5 horas em condições de cavitação, utilizando um microscópio eletrônico de varredura. O equipamento funcionou muito bem, produzindo os danos por cavitação na superfície dos corpos de prova.

Mesmo que não seja possível visualizar a forma dos microjatos na literatura, os resultados de distâncias e tempos obtidos aqui são próximos aos disponíveis na bibliografia, resultando em uma boa aproximação para o fenômeno dos microjatos. Neste sentido, o modelo de microjatos hiperbólicos funcionou bem ao explicar os pits de cavitação.

O escoamento potencial também deu bons resultados porque a viscosidade da água é relativamente baixa, e a compressibilidade da água líquida é desprezível, já que ela deve

aparecer somente no estágio final do colapso da cavidade, que é um processo muito rápido, de cerca de milissegundos.

Conflito de interesse

Não há conflitos de interesse.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J.C. **Projeto Mecânico. Enfoque Baseado na Fadiga e na Mecânica da Fratura**. Segunda edição Editora Edigard Blucher Ltda, 2024.

BAZANINI, G.. Temperature Calculation Inside Collapsing Bubbles in Compressible Liquids, **Anais. 2nd BRAZILIAN CONGRESS ON MANUFACTURING ENGINEERING (COBEF)**, Uberlandia, Brazil, 2003.

BAZANINI, G. BARBOSA Jr., A.F., LIMA, N.N.C. Erosion and Corrosion by Micro- jets and High Temperature Cavity Impaction on Metal Surfaces, **Anais. 9th BRAZILIAN CONGRESS ON MANUFACTURING ENGINEERING (COBEF)**, Joinville, Brazil, 2017.

BAZANINI, G.: BRESSAN, J.D.: Hot Vapor Bubble Prints on Carbon Steel. **Journal of Applied Mathematics and Physics**, Vol. 5, p. 439-448, 2017.

BAZANINI, G., UNFER, R.K., Theoretical Analysis of Growth and Collapse of Spherical Cavities, **Semina** v. 46, July, 2025, doi: 10.5433/1679-0375.

BAZANINI, G.; UNFER, R.K.; LIMA, N.N.C.: Crescimento e Colapso de Bolhas - Uma comparação com o Modelo de Universo Finito. **Revista Tecnologia**, Vol. 41, p 1-11, 2020.

BRENNEN, C.E. **Cavitation and Bubble Dynamics**. Oxford University Press, New York, USA, 1995.

CHORLTON, F. **Textbook of Fluid Dynamics**. CBS Publishers and Distributors pvt Ltda., New Delhi, 2004.

FRANK, J.C.; MICHEL, J.P. **Fundamentals of Cavitation**. Kluwer Publishers, 2005.

COLE, G.H.A. **Fluid Dynamics**. Methuen's Monographs on Physical Subjects. Methuen & Co. Ltda. London, Great Britain, 1962.

KULMANN, J., LOZANO, C.L.A., HANKES, S., KAISER, S.A. Correlation of Laser-Induced Single Bubbles With Cavitation Damage Via In-Situ Imaging, **Wear**, 522, 2023.

NICOUD, F. **Mécanique des Fluides**. <http://.math.univ-montp2.fr/~nicoud/>, 2015.

PETIOT, J. **Les Premiers Textes de René Thom Sur la Morphogenèse et la Linguistique: 1966-1970**, <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01265180v2>, 2015.

RICCIERI, A.P. **Fractais e Caos. A Matemática de Hoje**. Edição Prandiano, 1990.

VENTURI, J.J. **Cônicas e Quádricas**. 5 ed. Artes Gráficas e Editora Unificado, 2003.